



# 基于双五次多项式的智能汽车换道路径规划研究

## 摘要

快速准确地进行换道路径规划、有效跟踪期望路径以及换道过程中保持车辆的操纵稳定性,是保障智能汽车主动安全的核心技术.针对智能汽车主动换道过程中的路径规划问题,引入中转位置,提出基于双五次多项式的路径规划策略,以提高换道路径的平滑性,保证车辆换道安全性,满足换道实时性要求.对主动换道场景进行分析,确定换道初始及目标位置;基于车辆换道过程中的临界碰撞点,提出双五次多项式换道路径规划策略;建立联合仿真模型,针对不同道路状态进行主动换道仿真试验.结果表明:由于引入了中转点,利用双五次多项式规划方法得到的换道路径在临界碰撞状态前有更明显的侧向位移,能避开前方障碍物保证了换道安全性;换道中转位置处车辆最大侧向加速度不超过  $2\text{ m/s}^2$ ,保证了换道过程中车辆操纵稳定性;在干燥路面与湿润路面工况下,换道所需纵向安全距离减小  $20\text{ m}$  左右,保障了换道过程的纵向碰撞的安全性.研究结果可以为智能汽车主动换道路径规划提供理论及实践依据.

## 关键词

主动换道; 路径规划; 双五次多项式; 中转点; 智能汽车

中图分类号 U469.72

文献标志码 A

收稿日期 2023-06-14

资助项目 中央高校基本科研业务费专项资金(2572019BG01)

## 作者简介

李胜琴,女,博士,教授,主要从事车辆系统动力学及控制.lishengqin@126.com

## 0 引言

据统计,2021年末全国民用汽车保有量30151万辆,比2020年末增加2064万辆<sup>[1]</sup>.根据世界卫生组织(WHO)报告数据显示,每年有130多万人死于道路交通事故,并有5000多万人因此受伤<sup>[2]</sup>.对导致交通事故的原因进行分析,发现人为失误造成的交通事故占比达到55%~90%<sup>[3]</sup>.汽车主动防撞系统作为主动安全必不可少的一部分,可以有效防止碰撞事故的发生,受到各大车企和研究机构的关注,是汽车领域的热门研究课题.

车辆换道作为一种常见的驾驶行为,对车辆行驶安全性和道路通行效率有很大程度的影响,车辆平稳快速的换道可提高道路通行效率,减少交通事故的发生.当车辆存在碰撞风险时,主动换道避撞相比制动避撞所需的纵向极限安全距离短,避撞效果更好<sup>[4]</sup>.因此,合理有效的换道路径规划影响换道过程的安全性、高效性和舒适性.本文主要针对智能汽车的换道路径规划进行研究.

局部避障路径规划作为汽车主动防撞系统的关键技术,其原理是通过车载传感器、雷达、摄像头等采集道路环境信息与自车信息等,规划出一条能够避开障碍物、保障汽车安全行驶的路径<sup>[5]</sup>.常用的路径规划方法有基于参数化曲线的路径规划方法、基于搜索路径规划方法、基于优化的路径规划方法以及智能算法等<sup>[6]</sup>,后两类算法不能保证路径规划实时性,且所得解不一定是全局最优解.Blank等<sup>[7]</sup>采用最小曲率半径的方法进行路径规划,保证了换道过程中最短路径,但没有考虑路径和车辆的动态约束,使得换道不稳定.张琳等<sup>[8]</sup>基于滚动窗口优化算法提出一种周围环境未知时的规划方法,并根据评价指标得出当前规划窗口下的局部最优路径,最终得到全局最优路径,能够在具有多个障碍物的复杂环境中,同时满足行驶安全和全局最优的动态路径规划方法,但该算法阶次较高、计算较为复杂.Tu等<sup>[9]</sup>根据人工势场法,通过高斯组合隶属函数建立关于道路和障碍车辆的势场函数作为其成本函数,利用启发式搜索算法选取预测路径,从而获得相应的控制量,但未考虑换道始末状态车辆的航向角变化.张新锋等<sup>[10]</sup>基于贝塞尔曲线对车辆避障路径进行规划,通过控制点改变曲线的平滑度、曲率等,但当车辆紧急避障时,贝塞尔曲线的控制点不易寻找.An等<sup>[11]</sup>基于五次多项式模型,对车辆运动进行规划,在纵向上采用六次多项式,对路径曲线进行求解.陈智伟等<sup>[12]</sup>通

1 东北林业大学 机电工程学院,哈尔滨,150040

过神经网络对野外环境进行建模,建立约束并优化约束函数进行规划,最后利用  $N$  阶多项式进行曲线拟合,可有效实现野外环境中的障碍规避,同时生成最终路径,但无法处理复杂环境.目前,基于随机采样的算法,搜索结果随机性较大,且容易陷入局部最优.基于优化的方法,需要大量的迭代和优化过程,较难在高速、动态的交通环境中使用.针对汽车的路径规划方法中基于参数化曲线的路径规划方法,其参数难以选取,计算复杂.

综上所述,在换道路径规划中,五次多项式被广泛应用,换道时通过增加约束方程阶次来避免碰撞,阶次越高轨迹规划就更精确,但同时会更加复杂,增加计算量,导致规划时间增加,降低了安全性.为了保证换道路径规划的时效性,本文采用五次多项式方法,基于换道路径中转点,提出双五次多项式主动换道路径规划方法,通过换道时间的选取来满足换道过程中的约束,既可以提升换道的安全性又能保证路径规划算法的实时性.

## 1 换道场景简化及传统五次多项式法

### 1.1 换道场景简化

本文主要针对智能汽车的主动换道行为进行研究.当车辆前方出现障碍物时,采取主动换道避让的方式,通过合理有效的路径规划技术指引汽车避开障碍物.针对两车道高速公路直线路段的换道场景,智能汽车均在单向双车道上靠右侧行驶,并向左执行换道行为,车道宽度确定为 3.75 m.对行车环境进行如下简化:

- 1) 换道前自车以大于安全跟车距离的车距跟随前车行驶;
- 2) 忽略换道过程中侧向速度变化对纵向速度的影响;
- 3) 周围车辆在换道过程中按当前速度匀速行驶;
- 4) 换道完成后,继续进行跟车调整,保持安全距离.

当智能汽车进行换道操作时,初始车道后方的障碍车也会影响智能汽车的换道.为便于展开相关研究,进行以下假设:

- 1) 初始车道后方车辆不影响换道车辆的运动,不会强制超车,与换道车辆保持安全车距;
- 2) 目标车道有充足的换道空间时,智能汽车才会换道.

简化后的主动换道避让场景如图 1 所示,  $M$  表示主车,  $C$  表示障碍车.换道过程可以视为主车  $M$  为了避免碰撞,从本车道绕开障碍车  $C$  到相邻车道的过程.

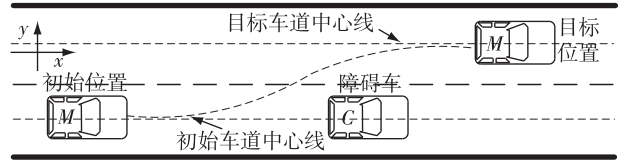


图 1 简化后的主动换道场景

Fig. 1 Simplified active lane change scenario

### 1.2 传统五次多项式路径规划方法

根据前文简化后的主动换道场景,当智能车辆行驶在道路上,前方出现障碍车时,换道路径规划主要考虑主车  $M$  在换道过程中避免与障碍车  $C$  碰撞.采用五次多项式进行换道路径规划,只需明确车辆的起始和最终位置,即在主车的初始状态  $(x_0, \dot{x}_0, \ddot{x}_0, y_0, \dot{y}_0, \ddot{y}_0)$  和主车的目标状态  $(x_{t_f}, \dot{x}_{t_f}, \ddot{x}_{t_f}, y_{t_f}, \dot{y}_{t_f}, \ddot{y}_{t_f})$  之间计算出一条能避免碰撞的平滑曲线作为换道路径.其函数模型表达式为

$$\begin{cases} x(t) = \sum_{i=0}^5 a_i t^i, \\ y(t) = \sum_{i=0}^5 b_i t^i. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $a_i$  和  $b_i$  为待定系数;  $t$  为时间;  $x(t)$  为纵向状态;  $y(t)$  为侧向状态.在车辆换道的初始状态,其侧向位移、侧向速度、侧向加速度均为零.经过纵向距离  $D$  车辆完成换道,其目标状态的侧向位移为  $W$ ,侧向速度和侧向加速度均为零.路径应满足如下约束:

$$\begin{cases} y(t_0) = \dot{y}(t_0) = \ddot{y}(t_0) = 0, \\ y(t_f) = W, \dot{y}(t_f) = \ddot{y}(t_f) = 0, \\ x(t_0) = \dot{x}(t_0) = 0, \dot{x}(t_0) = v_x, \\ x(t_f) = D, \dot{x}(t_f) = v_x, \ddot{x}(t_f) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $t_0$  为换道开始时刻为 0;  $t_f$  为换道结束时长;  $W$  为车辆换道的侧向位移,取 3.75 m;  $D$  为车辆换道过程的纵向位移,换道过程中假设车辆纵向速度保持不变,则  $D = v_x t_f$ .

根据式(2)约束对式(1)求解,得:

$$\begin{cases} a_0 = 0, a_1 = v_x, a_2 = 0, \\ a_3 = \frac{1}{t_f^3}(10D - 10v_x t_f), \\ a_4 = \frac{1}{t_f^4}(-15D + 15v_x t_f), \\ a_5 = \frac{1}{t_f^5}(6D + 6v_x t_f), \\ b_0 = b_1 = b_2 = 0, b_3 = \frac{10W}{t_f^3}, \\ b_4 = -\frac{15W}{t_f^4}, b_5 = -\frac{6W}{t_f^5}. \end{cases} \quad (3)$$

将求得的  $a_0 \sim a_5, b_0 \sim b_5$  代入式(1), 得到换道路径方程为

$$\begin{cases} x(t) = v_x t, \\ y(x) = \frac{W}{t_f^5}(10t_f^2 t^3 - 15t_f t^4 + 6t^5). \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知, 当换道车辆的初始纵向车速确定时, 换道时间  $t_f$  为式中唯一变量, 故可根据约束条件确定换道时长  $t_f$ , 即可确定换道路径。

车辆换道过程中, 侧向加速度过大会导致车辆在换道过程中具有侧滑或侧翻风险, 故需要约束车辆在换道过程最大侧向加速度. 为了避免车辆失稳, 车辆侧向力不应超过轮胎附着力约束, 轮胎最大附着力为

$$F_{\max} = \mu g. \quad (5)$$

式中:  $\mu$  为路面附着系数;  $g$  为重力加速度. 由此可得车辆纵、侧向加速度约束方程为

$$\sqrt{a_x^2 + a_y^2} \leq \mu g. \quad (6)$$

假设车辆在换道过程匀速行驶, 纵向速度不变, 则纵向加速度为 0, 可得:

$$|a_{y\max}| \leq \mu g. \quad (7)$$

对换道时间  $t_f$  进行控制, 即可实现对车辆最大侧向加速度的约束。

对式(4) 求二阶导数, 可得:

$$a_y(t) = 60 \frac{W}{t_f^5}(t_f^2 t - 3t_f t^2 + 2t^3). \quad (8)$$

式(8)对  $t$  求导可得侧向加速度变化率为

$$j_y(t) = 60 \frac{W}{t_f^5}(t_f^2 - 6t_f t + 6t^2). \quad (9)$$

当侧向加速度率  $j_y(t) = 0$  时,  $a_y(t)$  取得极值, 可得最大侧向加速度  $|a_{y\max}| = \frac{5.78W}{t_f^2}$ .

换道侧向位移  $W = 3.75$  m, 故最小换道时间为

$$t_{f\min} = \sqrt{\frac{5.78W}{|a_{y\max}|}}. \quad (10)$$

车辆进行换道时, 其纵向速度远大于侧向速度, 质心侧偏角较小, 常用横摆角速度来表征汽车的运行路径. 换道时, 车辆横摆角速度约束条件为

$$-0.15 \text{ rad/s} < \omega_r(t) < 0.15 \text{ rad/s}. \quad (11)$$

在线性区域内车辆的侧向加速度和横摆角速度对方向盘转角的增益为

$$\begin{cases} a_y = \frac{v_x^2}{L(1 + Kv_x^2)}\delta, \\ \omega_r = \frac{v_x}{L(1 + Kv_x^2)}\delta. \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $L$  为车辆轴距, mm;  $K$  为稳定性因数,  $\text{s}^2/\text{m}^2$ ;  $\delta$

为前轮转角. 通过最大侧向加速度  $|a_{y\max}| = \frac{5.78W}{t_f^2}$  可

求得稳态横摆角速度为  $\omega_r = \frac{5.78W}{t_f^2 v_x}$ .

## 2 双五次多项式路径规划

基于五次多项式的路径规划换道安全距离大, 换道时间长. 为了提高换道的安全性并保证实时性, 本文基于五次多项式路径规划方法, 提出双五次多项式换道路径规划算法. 在初始状态和目标状态之间引入一个中转状态, 把中转位置作为第一次规划的终点和第二次规划的起点, 然后将两段路径拟合, 即为最终的换道路径, 其换道过程如图 2 所示, 其中  $C$  车为初始车道前方障碍车,  $M$  车为主车是需要进行换道的智能汽车。

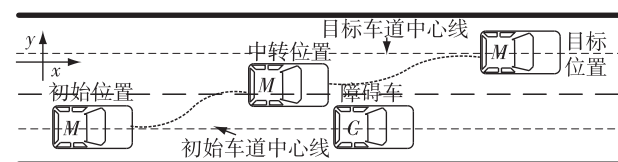


图 2 换道过程示意

Fig. 2 Schematic of lane change process

### 2.1 中转位置求解

中转位置的选取是根据主车的运行路径来确定的, 须考虑主车与障碍车车速、两车距离以及主车的位移等条件, 根据智能汽车的换道初始状态和障碍车的目前状态, 计算出合适的中转位置. 假定在局部路径规划周期内, 主车始终保持匀速直线行驶, 智能汽车的感知系统可以测得初始车道前方障碍车的速度和规划开始时刻智能汽车与障碍车之间的距离。

以主车初始状态的质心为坐标原点,即可预测障碍车未来一段时间的位置。

通过中转位置将智能汽车的换道过程分为两部分:智能汽车从初始位置到达中转位置时,通过对车辆侧向位移的约束,可以实现对障碍车的避撞;根据中转位置与目标位置的运动状态,进行第二段换道路径进行规划,此时智能汽车与障碍车不会发生碰撞,只需对换道路径进行简单无障碍换道路径规划即可<sup>[13]</sup>。

在  $t = t_m$  时刻,智能汽车  $M$  的右侧车头到达障碍车  $C$  的左侧,此时处于临界碰撞状态,如图3所示.要保证换道安全不发生碰撞,则必须满足:

$$x_{Cm} \geq x_{Mm} + l + w \sin \theta(t_m). \quad (13)$$

式中:  $x_{Cm}$  为  $C$  车在  $t_m$  时刻质心横坐标;  $x_{Mm}$  为  $M$  车在  $t_m$  时刻质心横坐标;  $l$  为车长;  $w$  为车宽;  $\theta$  为临界碰撞点处智能汽车与道路方向的夹角。

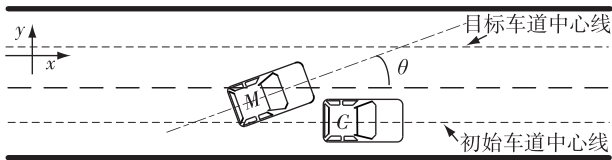


图3 临界碰撞位置示意

Fig. 3 Schematic of critical collision position

在换道过程中车身与道路纵向夹角非常小,因此可以忽略智能汽车在换道过程中的偏航角.车辆换道的中转状态假设为图4所示位置。

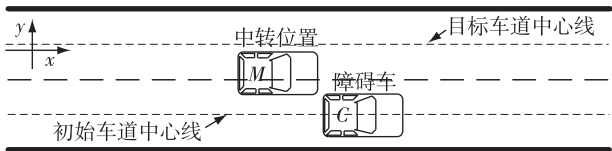


图4 中转位置示意

Fig. 4 Schematic of intermediate position

智能汽车在中转位置的状态为

$$(x_{tm}, \dot{x}_{tm}, \ddot{x}_{tm}, y_{tm}, \dot{y}_{tm}, \ddot{y}_{tm}) = (D_{Mm}, v_{Mm}, 0, W_{Mm}, 0, 0). \quad (14)$$

式中,  $D_{Mm}, v_{Mm}, W_{Mm}$  分别为智能汽车在  $t_m$  时刻换道中转位置的纵向位移、纵向速度和侧向位移.车辆的换道过程一般为加速换道过程,为完成换道取  $v_{Mm} = (1 \sim 1.4) v_{M0}$ .侧向位移略大于障碍车的宽度,一般取  $W_{Mm} = 1.8$  m.假设在较短的规划周期内,智能汽车是匀速行驶的,可得  $D_{Mm} = v_{Mm} t_m$ .

到达中转位置后,根据主车的中转状态和目标

状态进行第二次五次多项式路径规划如图5所示。

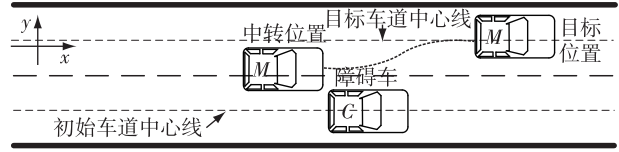


图5 第二次换道路径规划示意

Fig. 5 Schematic of path planning for second lane change

## 2.2 双五次多项式路径规划方法

引入中转位置状态函数之后,双五次多项式路径规划状态如式(15):

$$\begin{cases} S_0 = (x_{i0}, \dot{x}_{i0}, \ddot{x}_{i0}, x_{j0}, \dot{y}_{j0}, \ddot{y}_{j0}) = (0, v_{M0}, 0, 0, 0, 0), \\ S_m = (x_{tm}, \dot{x}_{tm}, \ddot{x}_{tm}, x_{tm}, \dot{y}_{tm}, \ddot{y}_{tm}) = \\ \quad (D_{Mm}, v_{Mm}, 0, W_{Mm}, 0, 0), \\ S_f = (x_{jf}, \dot{x}_{jf}, \ddot{x}_{jf}, x_{jf}, \dot{y}_{jf}, \ddot{y}_{jf}) = (D_{Mf}, v_{Mf}, 0, 0, 0, 0). \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $S_0, S_m, S_f$  分别为换道的初始状态、中转状态与目标状态。

假定在较短的规划周期内,智能汽车和障碍车均保持匀速运动,可得:

$$v_{M0} t = v_{C0} t + d_0. \quad (16)$$

式中:  $v_{M0}$  为智能汽车的初始速度, m/s;  $v_{C0}$  为障碍车的速度, m/s;  $d_0$  为开始换道时智能汽车与障碍车之间的距离, m.

在实际的行驶环境中,智能汽车的车速一般都是变化的,由式(16)可得,智能汽车在进行首次换道时的最大换道时间为

$$t_{fmax} = \frac{d_0}{v_{M0} - v_{C0}}. \quad (17)$$

在保证换道时间合理前提下,为了得到最优换道路径,引入路径评价函数进行最优化约束,得到目标函数为

$$\begin{cases} \min J(a_y, t_f, \omega_r) = \frac{a_y}{|a_{ymax}|} + \frac{t_f}{t_{fmax}} + \frac{\omega_r}{\omega_{rmax}}, \\ \text{s.t.} \begin{cases} |a_y| < |a_{ymax}|, \\ t_{fmin} < t_f < t_{fmax}, \\ |\omega_r| < |\omega_{rmax}|. \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

结合前文求得约束条件:  $|a_{ymax}| = \frac{5.78W}{t_f^2}, \omega_r =$

$\frac{5.78W}{t_f^2 v_x}$ ,代入式(18),求目标函数在约束条件下待定变量  $t_f$  的最优解:

$$\begin{cases} \min J(t_f) = \frac{5.78W}{t_f^2 \mu g} + \frac{t_f}{t_{f\max}} + \frac{5.78W}{0.15t_f^2 v_x}, \\ \text{s.t.} \begin{cases} |a_y| < a_{y\max}, \\ t_{f\min} < t_f < t_{f\max}, \\ |\omega_r| < \omega_{r\max}. \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

式中,选取的优化变量分别为侧向加速度  $|a_y|$ 、换道时间  $t_f$  及横摆角速度  $|\omega_r|$ 。

利用非线性规划算法求解上述目标函数,可得满足换道条件的换道时间  $t_f$ , 将其代入式(4)即可求出满足约束的最优换道路径。

经过两次五次多项式路径规划,有效地避免了智能汽车与初始车道前方障碍车的碰撞,将两段路径拟合,即可得到在初始车道前方有障碍车的情况下,完整的智能汽车的换道路径。基于双五次多项式的换道路径规划流程如图6所示。

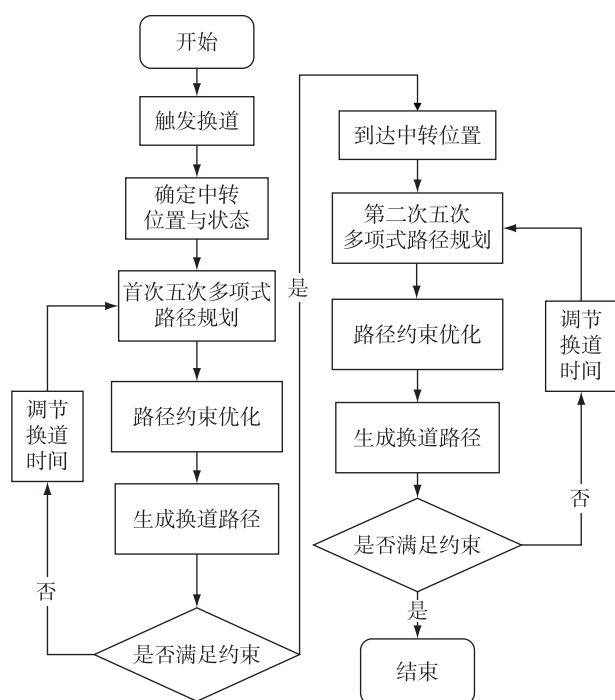


图6 换道路径规划流程

Fig. 6 Flow chart of path planning for lane change

### 3 路径规划仿真验证

基于 Matlab/Simulink 建立换道仿真模型,设置冰雪、湿润、干燥路面换道工况,路面附着系数分别为 0.2、0.6、0.8,对主动换道路径进行仿真计算.并将双五次多项式规划得到的换道路径与未优化五次多项式规划结果进行对比。

《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》

规定:在高速公路上,遇雨、雪气候条件导致能见度低时,车速不得超过 60 km/h,正常天气条件下最低车速不得低于 60 km/h,最高车速不得超过 120 km/h.基于此规定假设车辆在冰雪、湿润、干燥路况分别以 54 km/h、72 km/h 和 90 km/h 初速度行驶。

智能汽车与初始车道前方的障碍车之间的距离通过最短车头时距与智能汽车的车速来确定,如式(20)所示:

$$h_i = v_i \times t_i. \quad (20)$$

式中:  $h_i$  为极限车头间距, m;  $v_i$  为智能汽车车速, m/s;  $t_i$  为最短车头时距,一般取 2 s。

两车之间的距离由式(20)计算得出,并代入式(17)即可得出最大换道时间;再将路面附着系数与最大换道时间代入式(19),即可得到最优换道时间;最后将计算得出的最优换道时间代入式(4),即可得到最优换道路径。

#### 3.1 冰雪路面换道工况

当车辆在冰雪路面上进行换道操作时,路面附着系数  $\mu$  为 0.2,初始车道前方有障碍车.由式(20)计算两车之间的距离为 30 m,假设智能汽车起始时刻的速度为 54 km/h,初始车道前方障碍车的车速约为 50 km/h,得到最优换道路径函数为

第一段:

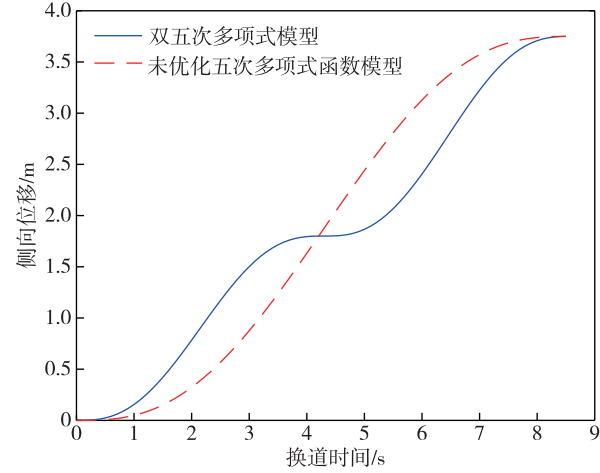
$$\begin{cases} x_{11}(t) = 0.2645 + 15t - 0.649t^3 + \\ 0.2645t^4 - 0.0264t^5, \\ y_{11}(t) = 0.2267t^3 - 0.0791t^4 + 0.0074t^5. \end{cases} \quad (21)$$

第二段:

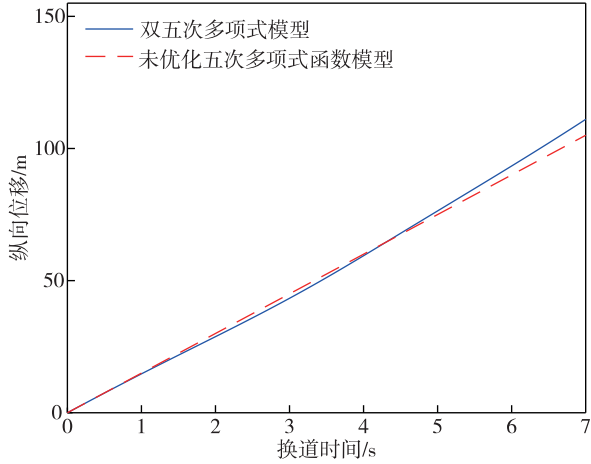
$$\begin{cases} x_{12}(t) = 64.47 + 18t - 0.4331t^3 + 0.1763t^4 - \\ 0.176t^5, \\ y_{12}(t) = 1.8 + 0.2456t^3 - 0.0857t^4 + 0.008t^5. \end{cases} \quad (22)$$

将双五次多项式规划得到的换道路径与未优化五次多项式规划得到的换道路径进行对比,得到的仿真结果如图7所示.由图7a可以看出,二者换道时间大致相同约为 8.4 s,在相同的工况下的横向路径规划上,双五次多项式规划通过引入中转状态,得到的换道路径在临界碰撞状态前有更明显的侧向位移,消除了由于车身尺寸等因素引起碰撞的可能性,能够有效避免与前方障碍车辆碰撞,确保了换道的安全性;由图7b可以看出,未优化的五次多项式换道曲线比双五次多项式规划的换道路径所需的纵向安全距离略小;由图7c可知,侧向加速度连续变化,双五次多项式方法在换道开始 4.2 s 时刻侧向加速

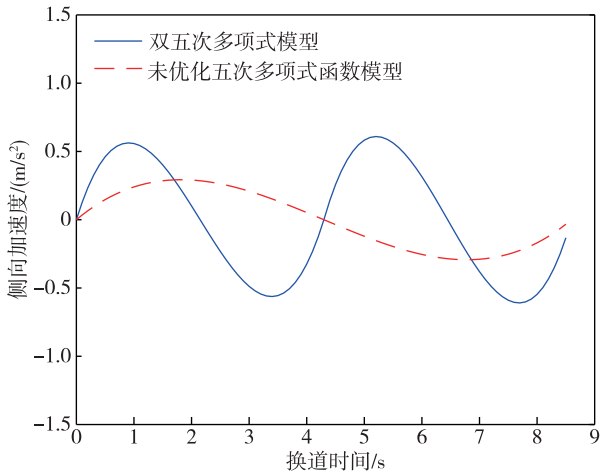
度变为 0,完成第一次路径规划到达中转位置,然后开始第二次路径规划,换道时侧向加速度  $|a_{y\max}| = 0.6094 \text{ m/s}^2 < 2 \text{ m/s}^2$ ,满足车辆动力学的约束条件.算法运行时间约为 1.8 ms,满足换道的实时性要求.



a. 侧向位移仿真曲线



b. 纵向位移仿真曲线



c. 侧向加速度仿真曲线

图 7 冰雪路况换道路径规划结果

Fig. 7 Path planning results for lane change on icy roads

### 3.2 潮湿路面换道工况

当车辆在潮湿路面上进行换道操作时,路面附着系数  $\mu$  为 0.6,初始车道前方有障碍车.由式(20)计算两车之间的距离为 40 m.假设执行换道的智能汽车起始时刻的速度为 72 km/h,前方障碍车的车速约为 70 km/h,得到最优换道路径函数为

第一段:

$$\begin{cases} x_{21}(t) = 20t - 0.169t^3 + 0.1474t^4 - 0.0214t^5, \\ y_{21}(t) = 0.4422t^3 - 0.1928t^4 + 0.0224t^5. \end{cases} \quad (23)$$

第二段:

$$\begin{cases} x_{22}(t) = 72.24 + 23t - 0.7194t^3 + 0.3589t^4 - \\ \quad 0.0441t^5, \\ y_{22}(t) = 1.8 + 0.4708t^3 - 0.2041t^4 + 0.0236t^5. \end{cases} \quad (24)$$

将双五次多项式规划与未优化五次多项式规划得到的换道路径进行对比,得到的仿真结果如图 8 所示.由图 8a 可知,双五次多项式规划通过引入中转状态,得到的换道路径在临界碰撞状态前有更明显的侧向位移,消除了由于车身尺寸等因素引起碰撞的可能性,能够有效避免与前方障碍车辆碰撞,确保了换道的安全性;由图 8b 可知,双五次多项式规划的换道路径的纵向位移比未优化的五次多项式换道曲线小 20 m 左右,换道所需纵向安全距离更小,安全性更高;由图 8c 可知,侧向加速度连续变化,双五次多项式方法在换道开始 3.4 s 时,侧向加速度变为 0,完成第一次路径规划到达中转位置,然后开始第二次路径规划,换道时侧向加速度  $|a_{y\max}| = 0.939 \text{ m/s}^2 < 2 \text{ m/s}^2$ ,满足车辆动力学的约束条件.算法运行时间约为 1.8 ms,满足换道实时性要求.

### 3.3 干燥路面换道工况

当车辆在干燥水泥路面上进行换道操作时,路面附着系数  $\mu$  为 0.8,初始车道前方有障碍车.由式(20)计算两车之间的距离为 50 m.假设执行换道的智能汽车起始时刻的速度为 90 km/h,前方障碍车的车速约为 85 km/h,得到最优换道路径函数为

第一段:

$$\begin{cases} x_{31}(t) = 25t - 0.7905t^3 + 0.4314t^4 - 0.0577t^5, \\ y_{31}(t) = 0.5486t^3 - 0.2571t^4 + 0.0321t^5. \end{cases} \quad (25)$$

第二段:

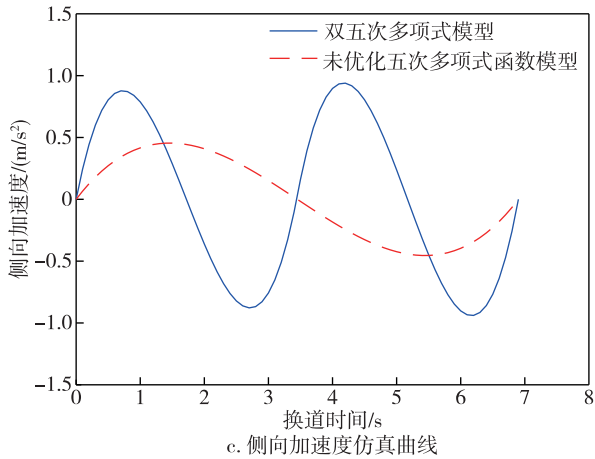
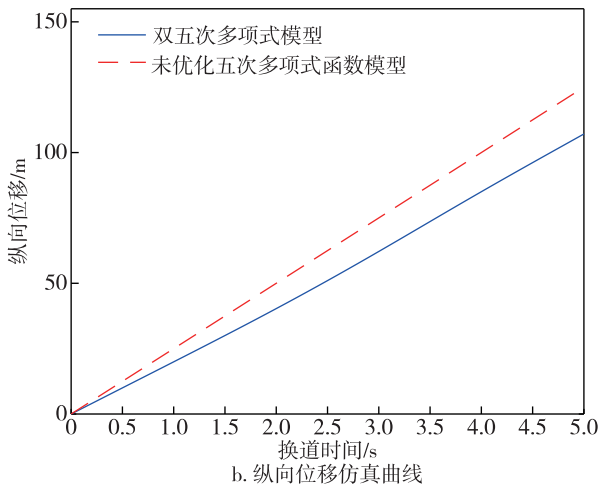
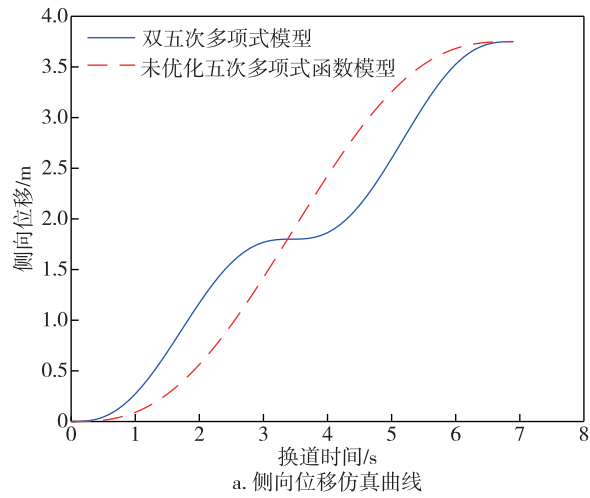


图 8 潮湿路况换道路径规划结果

Fig. 8 Path planning results for lane change on wet roads

$$\begin{cases} x_{32}(t) = 80 + 27t - 0.194 8t^3 + 0.182 2t^4 - \\ \quad 0.028 4t^5, \\ y_{32}(t) = 1.8 + 0.591 7t^3 - 0.276 8t^4 + 0.034 5t^5. \end{cases} \quad (26)$$

将双五次多项式规划得到的换道路径与未优化

五次多项式规划得到的换道路径进行对比,得到的仿真结果如图 9 所示.由图 9a 可以看出,双五次多项式路径规划通过引入中转状态,得到的换道路径在临界碰撞状态前有更明显的侧向位移,消除了由于车身尺寸等因素引起碰撞的可能性,能够有效避免

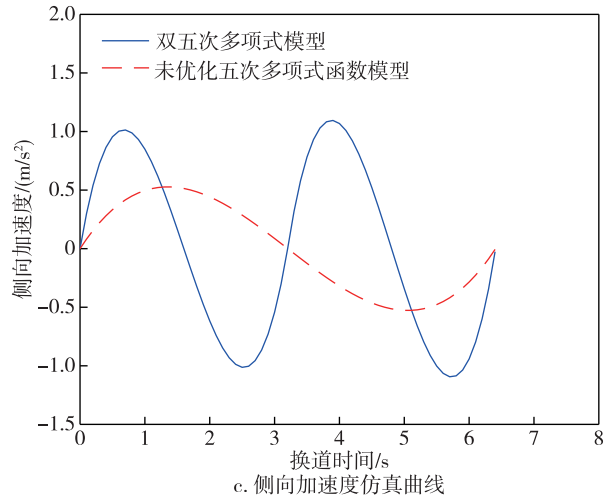
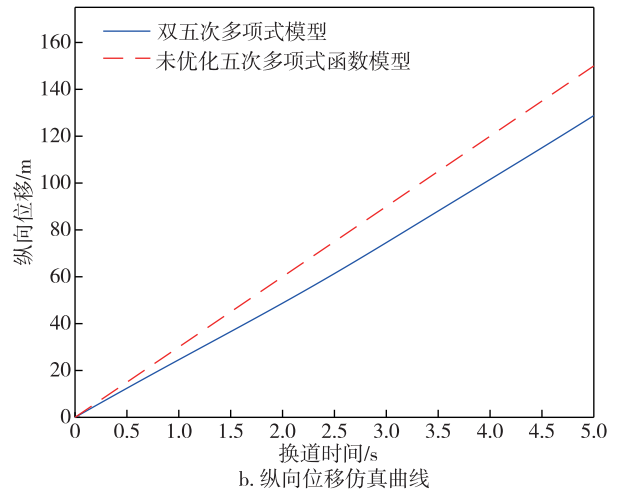
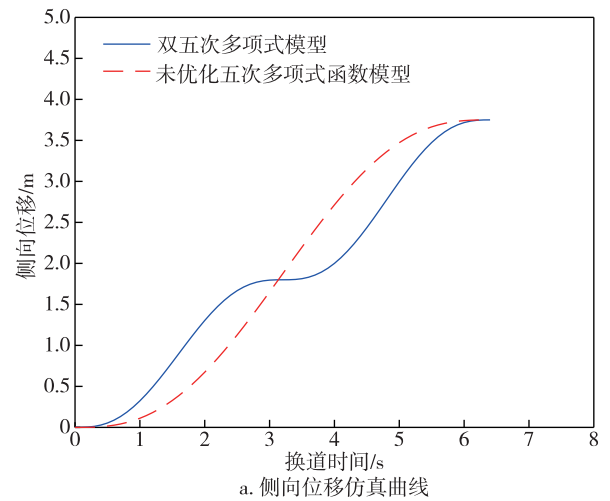


图 9 干燥路况换道路径规划结果

Fig. 9 Path planning results for lane change on dry roads

与前方障碍车辆碰撞;由图 9b 可知,双五次多项式规划的换道路径的纵向位移比未优化的五次多项式换道曲线短 20 m 左右,换道所需纵向安全距离小,安全性更高;由图 9c 可知,侧向加速度连续变化,双五次多项式方法在换道开始 3.2 s 时侧向加速度变为 0,完成第一次路径规划到达中转位置,然后开始第二次路径规划,换道时侧向加速度  $|a_{y\max}| = 1.094 \text{ m/s}^2 < 2 \text{ m/s}^2$ ,满足车辆动力学的约束条件,保证了换道安全性。

#### 4 结论

1) 针对单向双车道场景,以五次多项式函数模型为基础,以侧向加速度、换道时间、横摆角速度设计目标函数及约束条件,求解最优换道时间,将最优换道时间与智能汽车的初始位置和目标位置的运动状态带入五次多项式模型对智能汽车的换道路径进行规划,得到最优换道路径。

2) 通过对智能汽车与障碍物临界碰撞状态的分析,引入换道中转位置,提出双五次多项式路径规划方法,将智能汽车的换道过程分为两段,分别进行换道路径规划,提高了算法安全性。

3) 建立联合仿真模型,设置冰雪、潮湿和干燥路况,对所提出的换道路径规划方法进行验证。仿真结果表明:在不同工况下双五次多项式路径规划方法所规划出的路径,车辆侧向速度与加速度均满足车辆动力学的约束条件,侧向位移响应速度快,可有效避免碰撞事故;在干燥路面与湿润路面工况下,换道所需纵向安全距离减小 20 m 左右,提升了换道过程的安全性,保证了换道的实时性。

#### 参考文献

##### References

- [ 1 ] 国家统计局.中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报[J].中国统计,2022(3):9-26
- [ 2 ] 张亚丽.世界卫生组织发布《2018 年全球道路安全现状报告》[J].中华灾害救援医学,2019,7(2):100
- [ 3 ] 秦恩国.道路交通事故损失统计分析[J].内燃机与配件,2018(15):192-194
- [ 4 ] Tomar R S, Verma S, Kushwah R, et al. Collision avoidance warning for safe lane change[C]//2013 International Conference on Communication Systems and Net-

- work Technologies. April 6 - 8, 2013, Gwalior, India. IEEE, 2013:385-389
- [ 5 ] 朱伟达.基于改进型人工势场法的车辆避障路径规划研究[D].镇江:江苏大学,2017  
ZHU Weida. Research on path planning and obstacle avoidance method for vehicle based on improved artificial potential field[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017
- [ 6 ] 王莹,卫翀,马路.基于二次规划的智能车辆动态换道轨迹规划研究[J].中国公路学报,2021,34(7):79-94  
WANG Ying, WEI Chong, MA Lu. Dynamic lane-changing trajectory planning model for intelligent vehicle based on quadratic programming[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(7): 79-94
- [ 7 ] Blank M, Margolis D L. Minimizing the path radius of curvature for collision avoidance[J]. Vehicle System Dynamics, 2000, 33(3): 183-201
- [ 8 ] 张琳,章新杰,郭孔辉,等.未知环境下智能汽车轨迹规划滚动窗口优化[J].吉林大学学报(工学版),2018,48(3):652-660  
ZHANG Lin, ZHANG Xinjie, GUO Konghui, et al. Rolling window optimization for intelligent vehicle trajectory planning in unknown environment[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(3): 652-660
- [ 9 ] Tu Q A, Chen H, Li J C. A potential field based lateral planning method for autonomous vehicles[J]. SAE International Journal of Passenger Cars- Electronic and Electrical Systems, 2016, 10(1): 24-34
- [ 10 ] 张新锋,陈建伟,左思.基于贝塞尔曲线的智能商用车换道避障轨迹规划[J].科学技术与工程,2020,20(29):12150-12157  
ZHANG Xinfeng, CHEN Jianwei, ZUO Si. Trajectory planning for intelligent commercial vehicle obstacle avoidance based on quartic Bezier curve[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(29): 12150-12157
- [ 11 ] An G, Talebpour A. Lane-changing trajectory optimization to minimize traffic flow disturbance in a connected automated driving environment[C]//2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). October 27-30, 2019, Auckland, New Zealand. IEEE, 2019: 1794-1799
- [ 12 ] 陈智伟,胡劲文,赵春晖,等.野外无人车路径规划与轨迹规划技术[J].无人系统技术,2021,4(2):40-48  
CHEN Zhiwei, HU Jinwen, ZHAO Chunhui, et al. Path-planning and trajectory planning technology of unmanned ground vehicle (UGV) in the field [J]. Unmanned Systems Technology, 2021, 4(2): 40-48
- [ 13 ] 徐康俊.智能汽车换道轨迹规划方法的研究[D].镇江:江苏大学,2019  
XU Kangjun. Research on trajectory planning method for lane changing of intelligent vehicle [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019



## Lane change path planning for intelligent vehicles based on double quintic polynomial

LI Shengqin<sup>1</sup> ZHANG Mingrui<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

**Abstract** The rapid and accurate path planning for lane change, effective tracking of the desired path while maintaining vehicle stability during lane change are core technologies to ensure active safety for intelligent vehicles. Here, a path planning strategy based on double quintic polynomial and introduction of intermediate position is proposed for intelligent vehicles, with the purpose to perform smooth and safe lane-changing in real time. The active lane change scenario was analyzed to determine the initial and target positions of the lane change, then a lane-changing path planning strategy of double quintic polynomial was proposed based on critical collision position during lane change. And a co-simulation model was established to carry out active lane change simulation tests in different road conditions. The results show that the proposed lane-changing path planning strategy has more obvious lateral displacement due to the introduction of the intermediate position, which can avoid obstacles in front of the vehicle thus ensure the safe lane changing. Meanwhile, the maximum lateral acceleration of the vehicle at the intermediate position is no more than  $2 \text{ m/s}^2$ , which ensures the vehicle stability during lane change process. Furthermore, the required longitudinal safety distance for lane changing is reduced by about 20 m on both dry and wet roads, which reduces the longitudinal collision risk. The results provide theoretical and practical basis for active lane change path planning of intelligent vehicles.

**Key words** active lane change; path planning; double quintic polynomial; intermediate position; intelligent vehicle